

АНАЛИЗ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПО МЕТОДУ ДВУХ ИЗМЕРЕНИЙ

В. С. ДМИТРЕВСКИЙ

(Представлено научным семинаром по диэлектрикам)

Точность измерения распределения напряжения ранее описанным методом [1] зависит от следующих факторов:

- а) от точности применяемого измерительного прибора,
- б) от длины соединительных проводов,
- в) от изменения проводимости отдельных участков образца (например, за счет короны) при различных схемах включения прибора.

Таким образом, погрешность измерения распределения напряжения по поверхности изоляции можно записать:

$$a = a_1 + a_2 + a_3, \quad (1)$$

где a — погрешность метода измерения;

a_1 — погрешность, вносимая измерительным прибором;

a_2 — погрешность, вносимая соединительными проводами;

a_3 — погрешность за счет изменения проводимости отдельных участков образца при включении прибора.

Определим величины отдельных погрешностей и пути их уменьшения.

Влияние точности применяемого прибора на погрешность измерения

Для расчета влияния точности измерительного прибора на погрешность измерения распределения напряжения используем прием, описанный в [2]. Расчет погрешности измерения распределения напряжения проведем на основании следующей формулы, полученной нами ранее [1]:

$$U_2 = U \frac{U_2'}{U_1' + U_2'}. \quad (2)$$

Прологарифмируем формулу (2):

$$\ln U_2 = \ln U + \ln U_2' - \ln (U_1' + U_2').$$

Продифференцируем полученное выражение:

$$\frac{dU_2}{U_2} = \frac{dU}{U} + \frac{dU_2'}{U_2'} - \frac{d(U_1' + U_2')}{U_1' + U_2'}.$$

Заменим в полученном уравнении дифференциалы конечными приращениями

$$\frac{\Delta U_2}{U_2} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta U_2'}{U_2'} - \frac{\Delta U_1' + \Delta U_2'}{U_1' + U_2'}.$$

В этом выражении ΔU с соответствующими индексами есть абсолютная погрешность измерения величины. Заменим абсолютные погрешности измерения относительными по формуле:

$$a = \pm \frac{\Delta U}{U}.$$

Тогда относительная погрешность измерения запишется в виде:

$$\pm a_2 = \pm a \pm a_2' - \frac{\pm a_1' U_1' \pm a_2' U_2'}{U_1' + U_2'}. \quad (3)$$

При измерении одним прибором относительная погрешность остается примерно постоянной по величине. Проводя подробный анализ уравнения (3), приходим к выводу, что максимальная погрешность измерения будет иметь место при следующих условиях: $a_1' < 0$; $a_2' > 0$; $a > 0$; $U_1' \gg U_2'$. В этом случае относительная погрешность измерения будет равна:

$$a_{2\text{макс}} = 3a. \quad (4)$$

Во всех других случаях погрешность будет меньше и колеблется в пределах от a до $3a$.

Влияние длины соединительных проводов на погрешность измерения

На фиг. 1 и 2 представлены полные схемы замещения измерения распределения напряжения с учетом проводимости провода АВ (фиг. 3). Для этих схем замещения можно написать следующие уравнения:

$$I_a = U_2' (y_2 + y_2' + y''_{изм}) = (U - U_2') (y_1 + y_1'), \quad (5)$$

$$I_b = U_1' (y_1 + y_1' + y'_{изм}) = (U - U_1') (y_2 + y_2'). \quad (6)$$

При отсутствии измерительной системы

$$I = U_2 y_2 = (U - U_2) y_1. \quad (7)$$

В этих уравнениях

y_2' — общая проводимость провода АВ по отношению к земле,

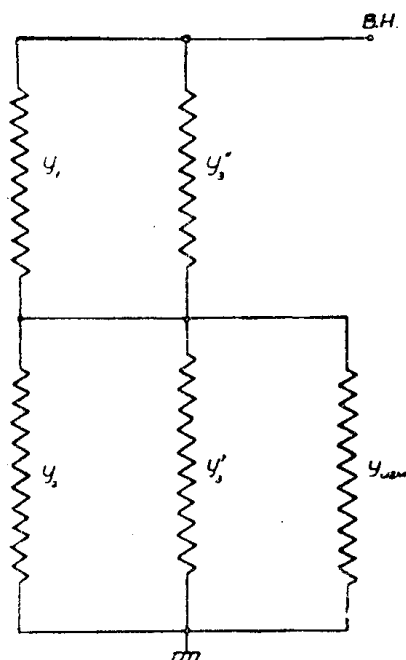
y_1' — общая проводимость провода АВ по отношению к высоковольтному электроду,

$y'_{изм}$ — общая проводимость измерительного прибора при включении его между зондом и высоковольтным электродом,

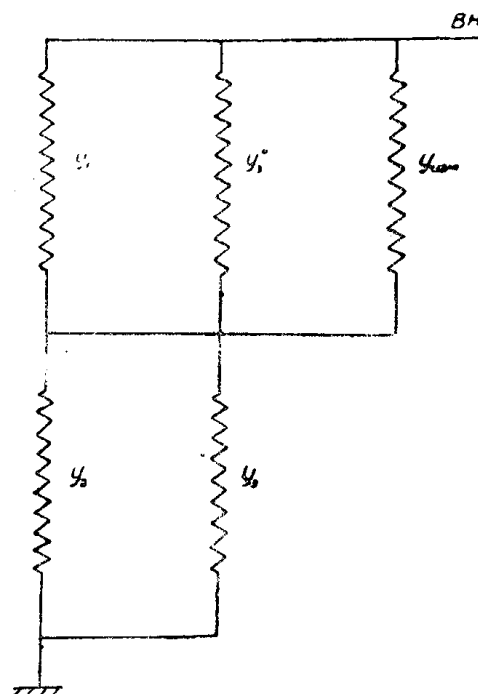
$y''_{изм}$ — общая проводимость измерительного прибора при включении его между зондом и заземленным электродом.

Решая систему уравнений (5), (6) и (7) относительно искомой величины U_2 , получим:

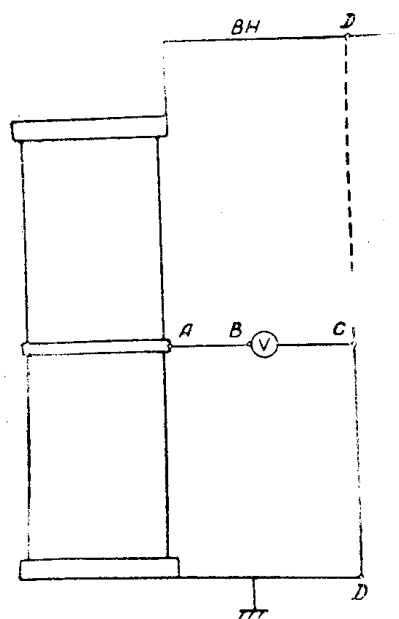
$$U_2 = \frac{UU_2'y''_{изм} + U_1'U_2'(y'_{изм} - y''_{изм}) - U(U - U_1' - U_2')y_1'}{U_1'y'_{изм} + U_2'y''_{изм} - (U - U_1' - U_2')(y_1' + y_2')} \quad (8)$$



Фиг. 1. Схема замещения измерения распределения напряжения при включении прибора между зондом и заземленным электродом.



Фиг. 2. Схема замещения измерения распределения напряжения при включении прибора между зондом и высоковольтным электродом.



Фиг. 3. Схема включения прибора при измерении распределения напряжения.

Вычислим погрешность измерения, получающуюся при подсчете U_2 по формуле (2), не учитывающей влияние общей проводимости провода АВ:

$$\begin{aligned} a'_2 &= \frac{\Delta U_2}{U_2} = \frac{U_2^{(2)} - U_2^{(8)}}{U_2^{(8)}} = \\ &= \left\{ \left[UU_2'y''_{изм} + U_1'U_2'(y'_{изм} - y''_{изм}) - U(U - U_1' - U_2')y_1' \right] \right. \\ &\quad \left. - y''_{изм} \right] \left[U_1'y'_{изм} + U_2'y''_{изм} - (U - U_1' - U_2')(y_1' + y_2') \right] \Bigg\} : \\ &\quad : \left\{ (U_1'y'_{изм} + U_2'y''_{изм}) \left[UU_2'y''_{изм} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + U_1'U_2'(y'_{изм} - y''_{изм}) - U(U - U_1' - U_2')y_1' \right] \right\}. \quad (9) \end{aligned}$$

Так как для большинства измерительных приборов общая проводимость мало меняется в пределах измерения по одной шкале, т. е. можно предположить $y'_{изм} = y''_{изм} = y_{изм}$, то формула (9) принимает следующий вид:

$$a'_2 = \frac{(U - U'_1 - U'_2)(U'_1 y'_1 - U'_2 y'_2)}{U'_2 (U'_1 + U'_2) y_{изм} - (U'_1 + U'_2)(U - U'_1 - U'_2) y'_1}.$$

В качестве примера подсчитаем погрешность измерения распределения напряжения по гирлянде изоляторов при различной длине провода АВ. Измерения проводились электростатическим вольтметром С-96, имеющим емкость $C_{изм} = 12 \text{ нф}$. При расчете будем учитывать только емкостную составляющую проводимости, так как при переменном напряжении активная составляющая будет мала.

1-й случай. Провод АВ длиной 45 см, диаметр 1 мм. При установке зонда на первый от провода элемент шестиэлементной гирлянды изоляторов были получены следующие результаты: $U'_1 = 3,7 \text{ кВ}$, $U'_2 = 10,7 \text{ кВ}$, $U = 17,8 \text{ кВ}$. Емкость провода АВ по отношению к земле можно определить как емкость цилиндрического конденсатора, внутренней обкладкой которого является поверхность провода АВ, а внешней — стены, пол и потолок.

$$C'_2 = \frac{1}{2 \ln \frac{R}{r}} = \frac{45}{2 \ln \frac{200}{0,05}} = 2,7 \text{ см} = 3 \text{ нф},$$

где $R = 200 \text{ см}$ — расстояние от провода до пола и стен, $r = 0,05 \text{ см}$ — радиус провода, $l = 45 \text{ см}$ — длина провода АВ. Емкость провода АВ по отношению к высоковольтному электроду можно определить как емкость двух параллельных проводов по формуле

$$C'_1 = \frac{l}{2 \ln \frac{S_{1,2}^2}{r_1 \cdot r_2}} = \frac{45}{2 \ln \frac{(25)^2}{0,05 \cdot 1}} = 2,39 \text{ см} = 2,66 \text{ нф},$$

где $S_{1,2}$ — расстояние между проводом АВ и силовым проводом,

r_1 — радиус провода АВ,

r_2 — радиус силового провода.

Вычислим погрешность измерения, вызываемую проводом АВ длиной 45 см:

$$a'_2 = \frac{(U - U'_1 - U'_2)(U'_1 y'_1 - U'_2 y'_2)}{U'_2 (U'_1 + U'_2) y_{изм} - (U'_1 + U'_2)(U - U'_1 - U'_2) y'_1} =$$

$$= \frac{(17,8 - 3,7 - 10,7)(3,7 \cdot 2,66 - 10,7 \cdot 3)}{10,7(3,7 + 10,7)12 - (3,7 + 10,7)(17,8 - 3,7 - 10,7) \cdot 2,66} = -0,0013.$$

2 случай. Длина провода АВ 120 см, диаметр 1 мм. При установке зонда на первый элемент шестиэлементной гирлянды изоляторов были получены следующие результаты:

$$U = 17,8 \text{ кВ}, \quad U'_1 = 4,35 \text{ кВ}, \quad U'_2 = 10 \text{ кВ}.$$

Емкость провода АВ по отношению к земле

$$C_2' = \frac{l}{2 \ln \frac{R}{r}} = \frac{120}{2 \ln \frac{200}{0,05}} = 7,25 \text{ см} = 8,05 \text{ пф.}$$

Емкость провода АВ по отношению к высоковольтному электроду

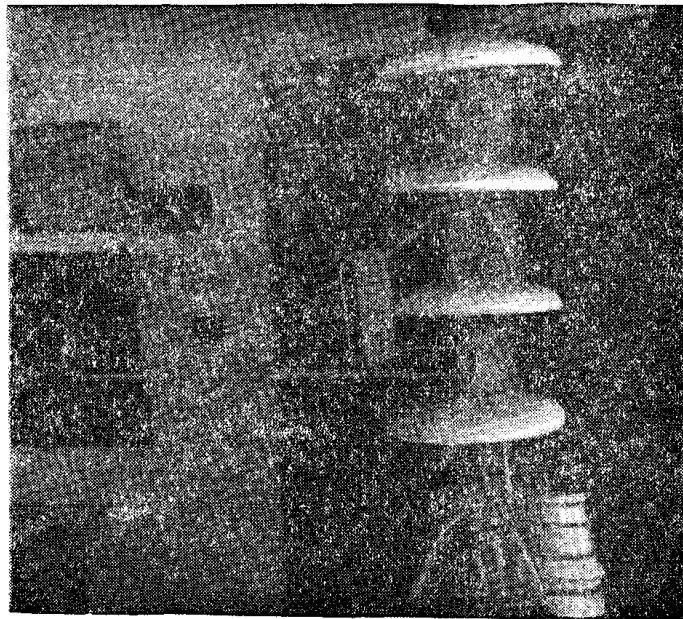
$$C_1' = \frac{l}{2 \ln \frac{S_{1,2}^2}{r_1 \cdot r_2}} = \frac{120}{2 \ln \frac{(25)^2}{0,05 \cdot 1}} = 6,4 \text{ см} = 7,1 \text{ пф.}$$

Погрешность, вносимая в измерения проводом АВ длиной 120 см, найдется:

$$a_2' = \frac{(U - U_1' - U_2')(U_1' y_1' - U_2' y_2')}{U_2'(U_1' + U_2') y_{изм} - (U_1' + U_2')(U - U_1' - U_2') y_1'} =$$

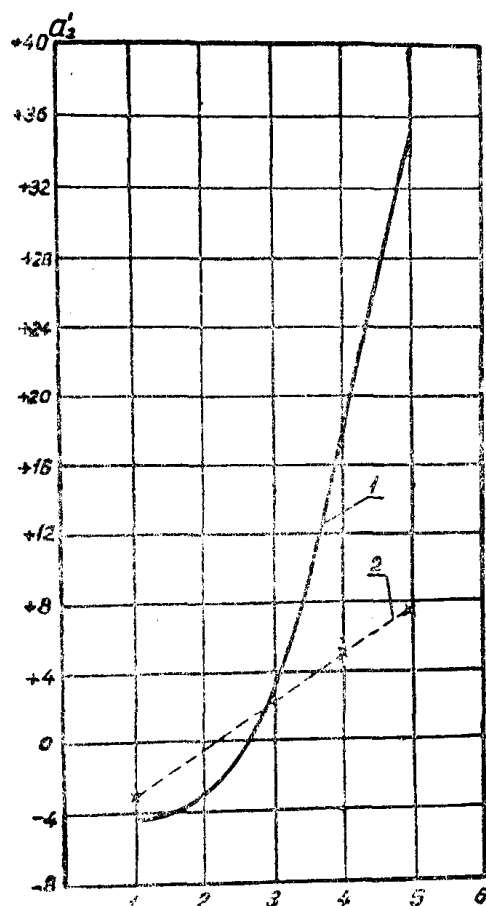
$$= \frac{(17,8 - 4,35 - 10)(4,35 \cdot 7,1 - 10 \cdot 8,05)}{10(4,35 + 10) \cdot 12 - (4,35 + 10)(17,8 - 4,35 - 10) \cdot 7,1} = -0,126.$$

Нами были проведены опыты с целью выяснения влияния провода АВ на точность измерения распределения напряжения по гирлянде изоляторов. Измерение распределения напряжения по гирлянде изоляторов проводилось по методу постоянного раздвига шаров с шарами диаметром 0,5 см и расстоянием между ними 0,08 см. Эксперименты проводились на шестиэлементной гирлянде изоляторов типа П-4,5, к шапке первого элемента которой присоединялся провод различной длины. На фиг. 4 представлена фотография таких измерений.



Фиг. 4. Фотография измерения распределения напряжения по гирлянде изоляторов при определении влияния провода АВ.

На фиг. 5 представлена зависимость погрешности измерения (кривая 1—теоретическая, кривая 2—экспериментальная) распределения напряжения, вносимой проводом АВ, при измерении падения напряжения на отдельных элементах гирлянды изоляторов. В этих экспериментах и расчетах длина провода АВ равнялась 46 см и диаметр—7,5 мм. Из фиг. 5 видно, что с увеличением номера элемента, считая от провода, погрешность измерения возрастает. Теоретическая зависимость погрешности измерения получается больше, чем экспериментальная. Это расхождение объясняется, по-видимому, неточным подсчетом проводимостей y'_1 и y'_2 и неучетом влияния проводимости между проводом АВ и отдельными элементами гирлянды изоляторов.



Фиг. 5. Погрешность измерения, вносимая проводом АВ.
1 — теоретическая кривая, 2 — экспериментальная кривая.

быстро, поэтому при производстве измерений длину провода АВ не следует брать более 0,5 м во избежание больших погрешностей. В случаях, когда провод АВ невозможно взять очень коротким (например, при измерении распределения напряжения по изоляционным конструкциям, помещенным в масло), следует его экранировать. Экран включается по схемам, приведенным на фиг. 6.

Установка экрана не должна влиять на распределение напряжения вдоль поверхности изоляции, по которой производится измерение. Исходя из этого, экран должен устанавливаться как можно дальше от объекта. Эксперименты показали, что экран, установленный на расстоянии 15 см от оси шестиэлементной гирлянды изоляторов, дает погрешность +27,6%. При установке экрана на расстоянии 50 см погрешность снижается до +3%.

Экран в этих экспериментах представлял собой полую стальную трубу диаметром 50 мм и длиной 1 м, внутри которой строго по центру пропусклся провод АВ диаметром 1 мм. Применяя экрани-

В табл. 1 приводится погрешность измерения падения напряжения на первом от провода элементе шестиэлементной гирлянды изоляторов при различной длине провода АВ.

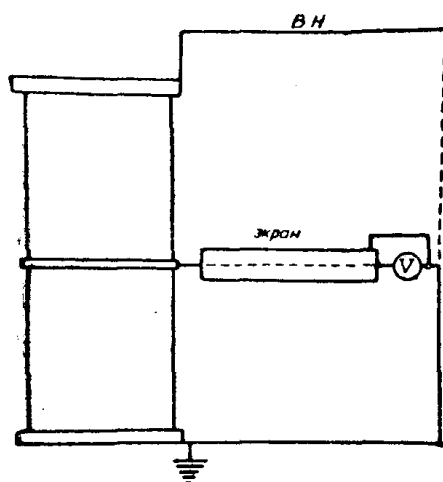
Таблица 1

Длина провода АВ, см	Диаметр провода АВ, мм	Вычисл. погрешн. %	Экспериментальная ошибка %
20	7,2	-0,37	-0,4
46	7,5		-3,3
95	8,2	-13	-11,4

№ элемента от провода

Из табл. 1 видно, что при увеличении длины провода АВ погрешность измерения возрастает очень

ровку провода АВ, можно значительно увеличить длину подводящих проводов, не снижая точности измерения. Это обстоятельство является чрезвычайно важным при измерении распределения напряжения вдоль поверхности твердого диэлектрика, погруженного в сосуд с жидкостью.



Фиг. 6. Способ включения экрана, устанавливаемого на проводе между прибором и зондом.

Влияние провода СД и кожуха прибора на погрешность измерения распределения напряжения вдоль поверхности диэлектрика исследовалось нами экспериментально вследствие трудности проведения теоретических расчетов. Эксперимент проводился следующим образом: к высоковольтному электроду присоединялся провод СД определенной длины. Противоположный конец провода СД был соединен с корпусом прибора. Проводилось измерение распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов по методу постоянного раздвига шаров. Затем провод СД присоединялся к заземленному концу гирлянды, и измерения проводились вторично. После этого провод СД с прибором удалялись, и измерялось распределение напряжения по гирлянде изоляторов. Ошибка измерения распределения напряжения вычислялась по формуле

$$a_2'' = \frac{U_{2изм} - U_{2ист}}{U_{2ист}}, \quad (10)$$

где

$U_{2ист}$ — падение напряжения, измеренное при отсутствии провода СД;
 $U_{2изм}$ — падение напряжения, пересчитанное по формуле (2).

В табл. 2 приводятся данные по вычислению погрешности измерения при различной длине провода СД. Диаметр провода был равен 1 мм. На фиг. 7 представлена фотография измерений.

Таблица 2

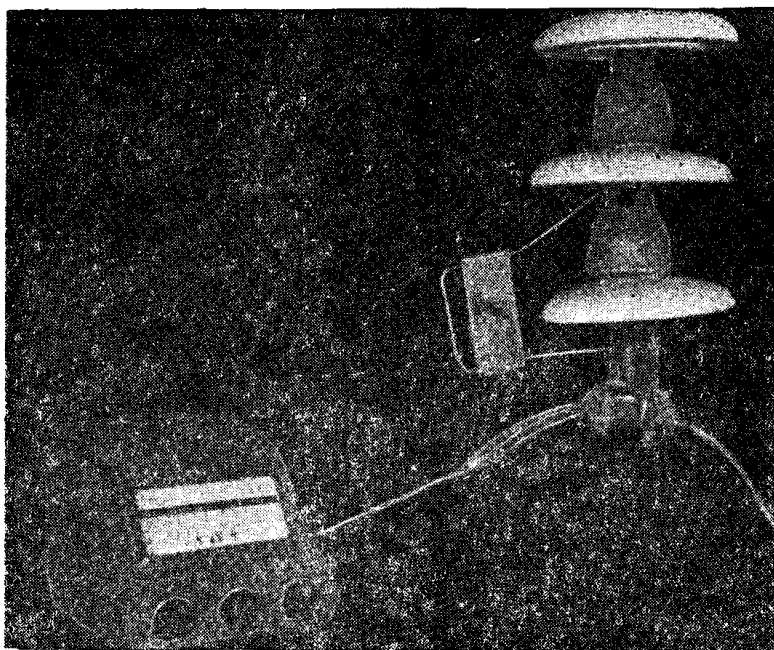
№ эл. от провода	Погрешность измерения в %	
	длина провода СД 45 см	длина провода СД 105 см
1	+4,1	+2
2	+4,8	+2,5
3	+3,8	+2,4
4	+2,7	+1,2
5	+1,5	+0,8
6	0	0

Из табл. 2 видно, что с увеличением длины провода СД (т. е. с увеличением расстояния до корпуса прибора) погрешность измерения уменьшается.

Погрешность измерения распределения напряжения, вносимая проводом СД и прибором, является положительной.

Суммарная погрешность измерения, вносимая соединительными проводами, найдется

$$a_2 = a_2' + a_2'' \quad (11)$$



Фиг. 7. Фотография измерения распределения напряжения по гирлянде изоляторов при определении влияния провода СД.

В табл. 3 приводятся значения погрешностей, получающиеся при измерении распределения напряжения вдоль шестиэлементной гирлянды изоляторов при расстоянии между прибором и гирляндой изоляторов 45 см. Диаметр соединительных проводов 1 мм.

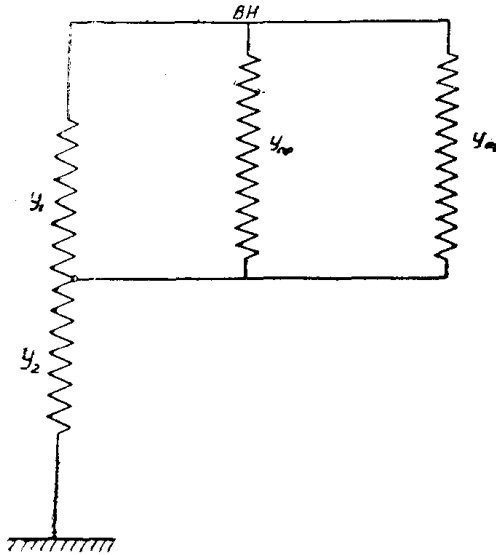
Таблица 3

№ элементов от провода	a_2' %	a_2'' %	a_2 %
1	- 3,6	+ 4,1	+ 0,5
4	+ 4,5	+ 2,7	+ 7,2
5	+ 7,6	+ 1,5	+ 9,1

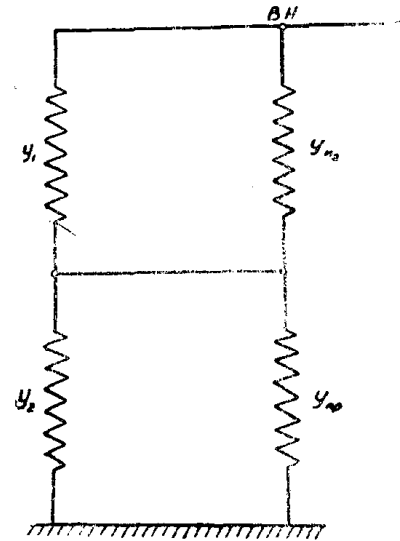
Влияние изменения проводимости отдельных участков образца на точность измерения распределения напряжения вдоль поверхности изоляции

Наиболее частой причиной, вызывающей изменение проводимости отдельных участков изоляционной конструкции, является корона. Поэтому в дальнейшем изменения проводимости по отдельным участкам мы будем считать происходящими только за счет зажигания короны у высоковольтного электрода.

На фиг. 8 и 9 представлены схемы замещения измерения распределения напряжения при наличии короны у высоковольтного электрода.



Фиг. 8. Схема замещения измерения распределения напряжения при наличии короны у высоковольтного электрода (прибор включен между зондом и высоковольтным электродом).



Фиг. 9. Схема замещения измерения распределения напряжения при наличии короны у высоковольтного электрода (прибор включен между зондом и заземленным электродом).

Для приведенных схем замещения можно записать следующие уравнения:

$$I_1 = y_2 (U - U_1') = (y_{k1} + y_1 + y_{np}) U_1', \quad (12)$$

$$I_2 = (y_2 + y_{np}) U_2' = (y_{k2} + y_1) (U - U_2'), \quad (13)$$

$$I = y_2 U_2 = (y_k + y_1) (U - U_2). \quad (14)$$

Решая совместно систему уравнений относительно U_2 , найдем

$$U_2 = \frac{U(U - U_1' - U_2')(y_{k2} - y_k) + U_1' U_2' (y_{k2} - y_{k1}) - U U_2' y_{np}}{(U - U_1' - U_2')(y_{k2} - y_k) + U_1' (y_{k2} - y_{k1}) - (U_1' + U_2') y_{np}} \quad (15)$$

Высчитаем погрешность измерения распределения напряжения при пользовании формулой (2)

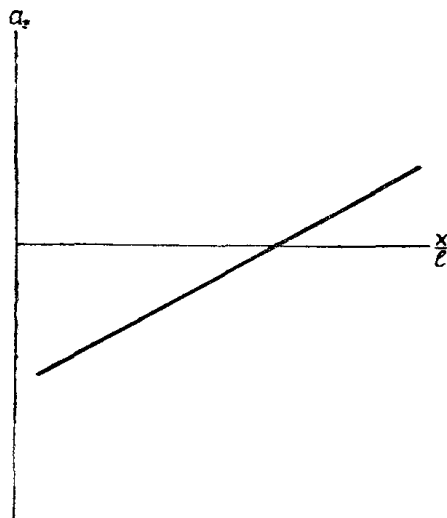
$$\alpha_3 = \frac{U_1' (U - U_1' - U_2') [U_2' (y_{k2} - y_{k1}) - U (y_{k2} - y_k)]}{(U_1' + U_2') [U U_2' y_{np} - U (U - U_1' - U_2') (y_{k2} - y_k) - U_1' U_2' (y_{k2} - y_{k1})]}.$$

При условии, что зонд не попадает в чехол короны, изменение проводимостей можно считать прямо пропорциональным величине изменения напряжения (учитывая, что эти изменения невелики) на высоковольтном участке образца. Так как при различном включении

прибора $U_{ист} - (U - U'_2)$ мало отличается от величины $U'_1 - U_{ист}$, то можно приближенно принять, что $U_{к2} - U_k = U_k - U_{к1}$.

Введение такого приближения будет вполне законно, если учесть, что с коронирующим участком образца, имеющим малое сопротивление, будет включен участок, имеющий большое сопротивление. Тогда погрешность измерения за счет короны будет изменяться от положительного значения, когда $U'_2 > \frac{1}{2}U$, до отрицательных значений,

когда $U'_2 < \frac{1}{2}U$, то есть изменение погрешности измерения будет



Фиг. 10. Распределение погрешности по длине образца при наличии короны у высоковольтного электрода.

иметь вид, показанный на фиг. 10. Вследствие отсутствия данных по точным величинам $U_{к2}$, U_k , и $U_{к1}$ не представляется возможным определить численное значение величины погрешности.

Суммарную погрешность измерения распределения напряжения вдоль поверхности диэлектрика при отсутствии короны можно подсчитать по формуле (13).

Величина погрешности прибора при пользовании измерительными шарами составит $a_1 = \pm 3\%$, а погрешность a_2 возьмем из таблицы 3, равной $\pm 9,1\%$. Тогда a будет равно

$$a = \pm 3,3 \pm 9,1 = (-0,1) \div (+18,1).$$

Проведенный анализ показал, что погрешность измерения $a = (-0,1) \div (+18,1)$ не выше погрешности известных методов измерения. В некоторых случаях погрешность измерения предлагаемым методом [1] будет ниже погрешности измерения известными методами (например, при измерении распределения напряжения вдоль поверхности изолирующей конструкции, погруженной в сосуд).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский В. С. К методике измерения распределения напряжения по изоляции. Изв. Томск. политехн. ин-та, т. 76, 142, 1954.
2. Богданова Т. Н., Субботина Е. П. Руководство к практическим занятиям по физике, часть I, изд. "Советская наука", 1949.

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
3	11 стр.	10^{16}	10^{-6}
9	9 св.	$5 \cdot 10^{-9}$ сек	$5 \cdot 10^{-9}$ сек
11	1 св.	$2 \div 3 \cdot 10_8$ — сек	$2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек
29	6 стр.	10^{-6} см/сек	10^6 см/сек
29	2 стр.	большой	большин
30	3 св.	10^{-6} сек	10^{-6} сек
32	6 стр.	спаянности	спайности
33	17 св.	10^{-8} сек	10^{-8} сек
34	3 св.	10^{-6} сек	10^{-6} сек
34	4,5 св.	$10^{-4} - 10^{-1}$ сек	$10^{-4} - 10^{-1}$ сек
34	19 св.	10^{-8} и 10^{-6} см/сек	10^{-8} сек и 10^6 см/сек
56	форм. 9	В конце фигурной скобки следует — 1.	
65	3 стр.	формулу	форму
91	5 св.	1350 ом и $R_T = 30$ ком	$R_T = 1350$ ом $R_T = 30$ ком
107	6 св.	$\tau = 10^{-6}$ сек	$\tau = 10^{-6}$ сек
109	16 стр.	образцов	микротвердости образцов
111	4 стр.	E	$E_{пр}$
112	рис. 9, 5 св.	поле однородное	поле неоднородное
116	12 стр.	Винчелла	Винчелл
123	7 св.	спаянность	спайность
128	32 св.	40 мол %	90 мол %
170	1 св.	ангенса	тангенс
217	15 стр.	При введении примесей типа внедрения	При введении примесей в твердые растворы типа внедрения
218	24 св.	Измерялась зависимость	Определялась зависимость
219	8 св.	хлористый рубидий	бромистый калий
219	22 стр.	хранения из монокристаллов	хранения монокристаллов
220	фиг. 2	В точке начала координат слева по оси lg z следует поставить — 12	
228	1 св.	выражение	выражение
228	5 св.	огда	тогда
228	6 св.	арфора	фарфора
228	7 св.	каркасном	в каркасном
228	8 св.	етальной	детальной
228	16 св.	гатушек	катушек
228	форм. 3	C_g	C_g
242	2 стр.	Из фиг. 1	Из диаграммы плавкости
244	11—12 стр.	рентгенограммы смещения	рентгенограммы сплава смещения
251	24 св.	с ионизованным	с ионизированным
301	7 стр.	монизирующих	ионизирующих
302	18 стр.	-процентного	50-процентного
306	9 стр.	95% монокристалла	95% плотности монокристалла
325	24 стр.	группы	II группы
332	6 стр.	$10^7 - 10^8$ ом/сек	$10^7 - 10^8$ см/сек
343	1 стр.	„438—1“	„ИЗВ—1“
394	8 стр.	Co	Co